

Л.Н. Ширин, В.А. Расцветаев, А.Л. Лебедь

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД С АРОЧНОЙ КРЕПЬЮ В ВЫРАБОТКАХ С ПОДВЕСНОЙ МОНОРЕЛЬСОВОЙ ДОРОГОЙ

L.N. Shyrin, V.A. Rastsvetaev, A.L. Lebed

### RESEARCH OF INTERACTION FEATURES BETWEEN A ROCK MASSIF AND AN ARCHED SUPPORT IN AN EXCAVATION WITH AN OVERHEAD MONORAIL

Проанализировано состояние транспортно-технологических систем горных предприятий в условиях шахт Западного Донбасса. Представлены результаты шахтных наблюдений проявления горного давления в выработках, закрепленных арочной крепью, с подвесной монорельсовой дорогой. Методом граничных элементов промоделировано поведение массива горных пород вокруг выработки с подвесной монорельсовой дорогой. Обоснована необходимость применения подвесных монорельсовых дорог в сложных условиях ведения горных работ на шахтах Западного Донбасса.

**Ключевые слова:** массив горных пород, подвесная монорельсовая дорога, арочная крепь

При проведении пластовых подготовительных выработок в слабометаморфизированных породах на расстоянии 50–100 м от забоя арочная крепь начинает испытывать дополнительные нагрузки, связанные с поднятием (пучением) почвы. Негативное воздействие пучения почвы в большей степени отражается на состоянии транспортных выработок, в которых деформируется не только крепь, но и рельсовый путь.

Анализ состояния рельсовых путей на шахтах ПО „Павлоградуголь“ показал, что знакопеременный профиль, образуемый вследствие пучения пород почвы в транспортных выработках, сдерживает своевременную доставку материалов и оборудования, а также откатку горной массы из забоя. Время, затрачиваемое на ремонт рельсового пути, в свою очередь влияет на пропускную способность выработок и темпы подвигания подготовительного забоя.

Исследованиями в области повышения устойчивости транспортных выработок с пучащими почвами рекомендуется ряд технологических мероприятий, направленных на уменьшение негативного их влияния, а именно: проведение выработок с подрывкой почвы, крепление их кольцевой крепью, перекрепление выработок, применение анкерного крепления почвы и кровли выработки и т.д. Следует отметить, что все мероприятия направлены на создание условий для применения рельсовых видов транспорта. Наиболее распространенным мероприятием в условиях шахт Западного Донбасса является периодическая подрывка пород почвы с последующим перекреплением выработки. Вместе с тем периодическая подрывка почвы выработки сопровождается нарушением ее пропускной способности и влияет на темпы проведения выработки.

В подобных условиях локомотивная откатка грузов по пластовым участковым подготовительным вы-

работкам становится малоэффективной, а при уклонах пути до 50 % становится невозможной. В этой связи на отдельных шахтах региона в качестве альтернативных средств вспомогательного транспорта при проведении выработок применяются напчовенные канатные дороги. Однако неудовлетворительное состояние рельсового пути и большая обводненность транспортных выработок ограничивают область эффективного их применения.

Подобные негативные явления особо заметны при отработке запасов у границ шахтного поля, когда действующая система вспомогательного транспорта не обеспечивает оперативную доставку грузов в протяженных наклонных выработках криволинейных в профиле и в плане. В целях повышения адаптивной способности и автономности подвижного состава для условий шахт Западного Донбасса рекомендовано [1] применять в качестве вспомогательного транспорта дизельные подвесные монорельсовые дороги (ПДМ), которые нашли широкое применение на шахтах России и дальнего зарубежья. Следует отметить, что в Украине отсутствует не только опыт их применения, несмотря на имеющиеся созданные канатные ПДМ, но и отсутствуют исследования условий взаимодействия элементов дороги с арочной крепью проводимых выработок. Экспертная оценка условий работы ПДМ на шахтах Красноармейского региона Донбасса показала, что с одной стороны арочная крепь испытывает влияние горного давления, а с другой – действие сил, вызванных динамикой движения монорельсового состава [2].

На рис. 1 наглядно отображен результат взаимодействия несущей рамы арочной крепи с массивом горных пород после многократного прохождения подвижного состава через стыковое соединение монорельса в одной из участковых транспортных выработок шахты „Красноармейская Западная №1“.

Результаты шахтных наблюдений послужили основой для выдвижения гипотезы о причинах подобного поведения податливой арочной крепи, на основании которой была разработана программа комплексных исследований.



Рис. 1. Результат взаимодействия несущей рамы арочной крепи с массивом горных пород после многократного прохождения подвижного состава через стыковое соединение монорельса

Существует несколько способов закрепления монорельса, но, как правило, несущим элементом является верхняя часть (верхняк) арочной крепи, который взаимодействует с массивом горных пород и непосредственно с ПДМ.

Для шахтных условий взаимодействие элементов крепи с горным массивом и монорельсовой подвешенной дорогой необходимо рассматривать как систему „горный массив – крепь – монорельсовая дорога“.

Указанная система состоит из взаимодействующих подсистем: „крепь – горный массив“, „крепь – монорельс“, „монорельс – подвижной состав“.

До настоящего времени взаимодействие элементов системы комплексно не рассматривалось, поэтому поведение системы в целом предлагается исследовать поэтапно, используя известные методы моделирования подсистем в приведенной выше последовательности. В настоящей работе впервые рассматриваются вопросы взаимодействия массива горных пород с крепью в выработках с ПДМ.

Описание поведения подсистемы „крепь – горный массив“ может быть осуществлено одним из рекомендуемых методов решения задач геомеханики [3].

Для рассмотрения представленной выше задачи о проведении подземных горных выработок с подвешенной монорельсовой дорогой наиболее приемлемым может быть метод граничных элементов [4]. Для этого необходимо принять допущения о начальном напряженном состоянии в массиве горных пород до проведения выработки. После проведения выработки начальное напряженное состояние изменяется и тогда полные напряжения  $\sigma_{ij}$  в любой точке горного массива можно представить как сумму начальных напряжений  $(\sigma_{ij})_0$  и изменений напряжений  $\sigma'_{ij}$  в этой точке

$$\sigma_{ij} = (\sigma_{ij})_0 + \sigma'_{ij}. \quad (1)$$

Как правило, изменения напряжений  $\sigma'_{ij}$  принято называть *дополнительными* напряжениями.

По аналогии с напряжением можно записать соотношение и для компонентов рассматриваемых смещений, а именно

$$s_i = (s_i)_0 + s'_i. \quad (2)$$

При решении задач геомеханики довольно часто начальные смещения  $(s_i)_0$  не учитываются, т.е. приравнивают к нулю, поэтому полные смещения  $s_i$  и дополнительные смещения  $s'_i$  совпадают. Необходимо также отметить, что символы  $\sigma'_{ij}$  и  $s'_i$ , используемые здесь, относятся к дополнительным напряжениям и смещениям.

Представленную задачу о напряжениях и смещении горных пород вокруг подземных горных выработок можно решить в три этапа.

На первом этапе обозначаются и допускаются параметры начального напряженного состояния, на втором обозначается и решается краевая задача в дополнительных напряжениях, смещениях и на третьем этапе слагаются дополнительные напряжения с начальными для нахождения полных напряжений в массиве горных пород вокруг горной выработки.

Постановка краевых задач в дополнительных напряжениях упрощается, если ввести понятия начальных  $(c_i)_0$ , дополнительных  $c'_i$  и полных усилий  $c_i$ . Для плоскости с внешней нормалью  $N_j$  соотношения между усилиями и напряжениями имеют вид

$$c_i = \sigma_{ji} N_j; (c_i)_0 = (\sigma_{ji})_0 N_j; c'_i = \sigma'_{ji} N_j. \quad (3)$$

Из выражения (1) и (2) следует

$$c_i = (c_i)_0 + c'_i, \quad (4)$$

и поэтому

$$c'_i = c_i - (c_i)_0. \quad (5)$$

Равенство (5) используется при задании граничных условий в дополнительных напряжениях. Например, если выработка не содержит искусственных опор, полные (или суммарные) усилия  $c_i$  на стенках выработки равны нулю. Тогда дополнительные усилия равны  $c'_i = -(c_i)_0 = -(\sigma_{ji})_0 N_j$  и, следовательно, являются известными. Начальные напряжения  $(\sigma_{ij})_0 N_j$  не обязательно должны быть постоянными во всем массиве, но они должны удовлетворять уравнениям равновесия.

Компоненты тензора напряжений в различных точках горного массива не могут быть заданы произвольно. Требование, чтобы породы горного массива находились в состоянии равновесия, накладывает на эти компоненты определенные условия. Во-первых, из условий равновесия моментов вытекает, что тензор напряжений симметричен [4], т. е.

$$\sigma_{ij} = \sigma_{ji} \quad (i, j = 1, 2 \text{ или } 3). \quad (6)$$

Это равенство означает, например, что если  $i = x$  (или 1);  $j = z$  (или 3), то  $\sigma_{xz} = \sigma_{zx}$  (или  $\sigma_{13} = \sigma_{31}$ ). Во-вторых, из условия равновесия сил следует, что компоненты тензора напряжений должны удовлетворять следующим уравнениям

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial z} + \alpha_x &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial z} + \alpha_y &= 0, \\ \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \alpha_z &= 0, \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ , и  $\alpha_z$  – объемные силы, которые в конкретных задачах заданы. Объемные силы  $\alpha_x$ ,  $\alpha_y$ , и  $\alpha_z$ , или кратко  $\alpha_i$ , имеют размерности сила/объем (т. е. единица их измерения Н/м<sup>3</sup>). Они представляют компоненты вектора и положительны, если действуют в положительных направлениях соответствующих координат. Приведенные уравнения (7) известны как дифференциальные уравнения равновесия или просто как уравнения равновесия [5].

Используя эти два условия, можно сократить запись уравнений и представить их в виде

$$\sigma_{ji,j} + \alpha_j = 0, \quad (8)$$

где индексы  $i$  и  $j$  принимают значения 1, 2 или 3 в трехмерном и 1 или 2 в двумерном случаях.

После того как граничные условия определены, поставленную задачу можно решить любым из существующих методов решения краевых задач [6].

Однако в сложных горно-геологических условиях и в породах со слабой степенью метаморфизации (в реальных условиях) очень часто наблюдается нарушение свода естественного равновесия. Основными причинами этого являются различного рода горно-геологические нарушения и трещины, образованные вследствие ведения горных работ. Особенно это актуально для ведения горных работ с применением подвесной монорельсовой дороги в качестве одного из видов транспорта. Поэтому возникает необходимость в разработке математической модели, на базе метода граничных элементов, для создания специальных вычислительных программ, позволяющих решать указанную выше задачу, учитывающих специфические (сложные) горно-геологические условия проведения горнотранспортных выработок и применения в них подвесных монорельсовых дорог.

#### Список литературы

1. Ширин Л.Н., Посунько Л.Н., Расцветаев В.А. Перспективы развития адаптационных систем вспомогательного транспорта в условиях шахт Западного Донбасса // Школа подземной разработки: Матер. междунар. научно-практ. конф. Днепропетровск – Ялта, НГУ, 2007. – 374 с.
2. Ширин Л.Н., Посунько Л.Н., Расцветаев В.А. Оценка эксплуатационных параметров подвесных монорельсовых дорог // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. – 2008. – №76. – С. 91–96.
3. Метод граничных элементов в задачах горной геомеханики / Новикова Л.В., Пономаренко П.И., Приходько В.В., Морозов И.Т. – Днепропетровск: Наука и образование, 1997. – 180 с.
4. Крауч С., Старфилд А. Метод граничных элементов в механике твердого тела: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 328 с.
5. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Метод граничных элементов: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 524 с.
6. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках: Пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 494 с.

Проаналізовано стан транспортно-технологічних систем гірничих підприємств в умовах шахт Західного Донбасу. Наведено результати шахтних досліджень прояву гірського тиску у виробках, закріплених арочним кріпленням, з підвісною монорейковою дорогою. Методом граничних елементів промодельовано поведінку масиву гірських порід навколо виробки з підвісною монорейковою дорогою. Обґрунтовано необхідність застосування підвісних монорейкових доріг у складних умовах ведення гірничих робіт на шахтах Західного Донбасу.

**Ключові слова:** масив гірських порід, підвісна монорейкова дорога, арочне кріплення

The state of transport-technological systems of the mining enterprises in the Western Donbass mines is analysed. Results of the mining pressure observations in the developments fixed by arch support with overhead monorail road are presented. The mining rock behavior around the development with the overhead monorail road by the boundary element method is simulated. Necessity of the overhead monorail roads implementation in the mines of Western Donbass difficult mining conditions is substantiated.

**Keywords:** massive rock, overhead monorail, arched support

Рекомендовано до публікації д.т.н. О.С. Пригуновим.  
Дата надходження рукопису 09.11.10